

УДК 621.311 : 568.264

В.А.МАЛЯРЕНКО, д-р техн. наук

Харьковская национальная академия городского хозяйства

В.Н.ГОЛОЩАПОВ, канд. техн. наук, Н.А.ОРЛОВА

Институт проблем машиностроения НАН Украины им. А.Н.Подгорного

УСЛОВИЯ ОДНОЗНАЧНОСТИ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМ РЕЖИМОМ ЗДАНИЙ

Приводится методика управления тепловыми режимами зданий с учетом внешних возмущающих воздействий. Установлена взаимосвязь коэффициентов теплоотдачи на наружной поверхности здания со скоростью и направлением ветра, что позволяет повысить качество управления тепловыми режимами зданий.

В связи с резким подорожанием природного газа вопросы энергосбережения в Украине стоят особенно остро. Жилищно-коммунальное хозяйство Украины потребляет около трети всех топливно-энергетических ресурсов страны. Для того чтобы снизить энергопотребление, предлагаются проекты реконструкции жилых зданий типовых серий массовой застройки, а также возводимых зданий с эффективным использованием энергии. Оценка потенциала энергосбережения проводится по международным стандартам и другим нормативам. В то же время отсутствует научная методика, на основе которой можно в целом оценить тепловой баланс как вновь возводимых зданий, так и реконструируемых с учетом их расположения, направления ветра, изменения температуры наружного воздуха.

Проектирование «энергоэффективных зданий» сводится к задачам «системного анализа», включающего три этапа [1]:

- построение математической модели теплоэнергетического взаимодействия здания с внешними возмущающими воздействиями;
- определение граничных условий и формулирование оптимизационной задачи;
- решение оптимизационной задачи.

Целью данной работы является разработка методики управления тепловым режимом зданий с учетом внешних возмущающих воздействий.

Поставленная цель достигается решением следующих задач:

- разработка модели управления тепловым режимом помещения с учетом внешних возмущающих воздействий;
- определение граничных условий на стеновых и светопрозрачных поверхностях зданий и сооружений с учетом внешних воздействий;
- разработка методики управления тепловой нагрузкой здания и

теплового района.

Нестационарный тепловой режим помещения рассматривается как процесс, включающий отдельные периоды остывания и нагрева помещения на определенном временном интервале. Величину длительности временного интервала изменения внешних возмущающих воздействий (температуры наружного воздуха t_n и значения скорости ветра) можно оценить путем контроля изменения температуры наружного воздуха в интервале 3, 6, 12 и 24 ч на протяжении нескольких отопительных периодов. С учетом сказанного выбрана его длительность в течение суток для отопительных сезонов 2001-2002, 2002-2003, 2003-2004 гг. г. Харькова, равная 12 ч [2].

Предлагаемая математическая модель управления тепловым режимом базируется на тепловом балансе помещения с учетом нестационарной теплопроводности через ограждающие конструкции при несимметричных граничных условиях на ее внутренней и наружной поверхности и при $t_b = const$ будет иметь вид:

$$t_u(\tau) = t_b + \frac{\alpha_g \cdot F_{cm}}{\alpha_u F_u} (t_b + t(0, \tau)) + \frac{k_{ок} F_{ок}}{\alpha_u F_u} (t_b - t_n) + \frac{Q_{п}}{\alpha_u F_u} + \frac{Q_{вент}}{\alpha_u F_u}. \quad (1)$$

В уравнении (1) $F_u, F_{cm}, F_{ок}$ – площадь источника теплоты (радиатора), наружных стен и окон, соответственно; α_u, α_g – коэффициент теплоотдачи источника теплоты и внутренней поверхности наружной стены; t_u – средняя температура источника теплоты $t_u = (t_{пр} - t_{обр})/2$; t_b – температура внутреннего воздуха рассматриваемого помещения, °C; t_n – температура наружного воздуха, °C; $t(0, \tau)$ – температуры на внутренней поверхности наружной стены; $Q_{п}$ – теплотери через перекрытие (для помещений первого или последнего этажа).

Временные условия при $\tau=0$ и $\tau=\infty$ могут быть представлены в виде функции распределения температуры по сечению ограждающей конструкции. Теплотехнические характеристики материала наружных стен здания зависят от его конструктивного исполнения.

Запишем уравнение (1) для панельных зданий блочного типа со следующими характеристиками: толщина наружной стены $\delta=0,35$ м, теплопроводность $\lambda=0,37$ Вт/(м К) [3], коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности $\alpha_b=7,3$ Вт/(м²К).

В результате преобразования уравнения нестационарной теплопроводности с помощью метода Фурье модель управления тепловым

режимом помещения (1) можно записать в виде:

$$t_u(\tau) = 21,5 + 7,3 \cdot \frac{F_{cm1}}{\alpha_u F_u} \cdot \left(21,5 - t(0, \infty) - \sum_{i=1}^4 A_{i_{cm1}} \cdot e^{-ak_i^2(\tau-0,77)} \right) + \\ + \frac{k_{ок} \cdot F_{ок}}{\alpha_u F_u} (21,5 - t_n) + \frac{Q_{вент}}{\alpha_{и} F_{и}} + \frac{Q_{п}}{\alpha_{и} F_{и}}; \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^4 A_{i_{cm1}} \cdot e^{-ak_i^2(\tau-0,77)} = (t_{\theta}(0) + 1,5) \left(-0,716 \cdot 10^{-4} \cdot \alpha_n^2 + 3,59 \cdot 10^{-3} \cdot \alpha_n - \right. \\ \left. - 0,5297 \right) \times 0,99965 \left[0,895 \cdot 10^{-3} \cdot \alpha_n^2 + 5,25 \cdot 10^{-2} \cdot \alpha_n + 22,36 \right]^2 (\tau-0,77),$$

где F_{cm1} , F_{cm2} – площадь наружных стен, соответственно;

$$\sum_{i=1}^4 A_{i_{cm1}} \cdot e^{-ak_i^2(\tau-0,77)}, \quad \sum_{i=1}^4 A_{i_{cm2}} \cdot e^{-ak_i^2(\tau-0,77)} \quad \text{– коэффициенты,}$$

которые вычисляются для каждой стены, исходя из решения характеристического уравнения; $t'(0, \infty)$ – температуры на внутренней поверхности соответствующей стены. В момент времени $\tau = \infty$ ограждение достигает стационарного теплового состояния. Отсутствие одной из стен учитывается в уравнении (2) коэффициентом $A_{i_{cm2}} = 0$.

При определении граничных условий на наружных поверхностях стен было принято, что пульсационная составляющая скорости $\bar{U}(Z)$ содержит постоянную (среднюю во времени) и продольную пульсационную составляющие U' согласно зависимости Давенпорта [4]

$$U' = 0,3 \cdot \bar{U}(Z). \quad (3)$$

Здесь $\bar{U}(Z)$ – скорость ветра перед зданием на высоте Z от поверхности земли, которая может быть представлена зависимостью

$$\bar{U}(Z) = U_0 \left(\frac{h}{h_0} \right)^n, \quad (4)$$

где n – показатель степени, зависящий от рельефа местности и скорости U_0 ; h_0 – высота расположения флюгера; U_0 – скорость ветра на высоте h_0 [4].

При натекании ветрового потока на стену здания на ее большей части формируется область торможения, а на краях (на расстоянии около 4,5-5 м) – области градиентного течения, вызванные поворотом

потока перед боковыми стенами и крышей [5]. Примем длину области градиентного течения $l=5$ м. В этом случае коэффициент теплоотдачи в области торможения потока, натекающего перпендикулярно на стену, для областей изменения пульсационной составляющей $U' < 6,5$ м/с определится зависимостью

$$\alpha_0 = 23,85 \cdot U' . \quad (5)$$

Среднее значение коэффициента теплоотдачи в области градиентного течения равно

$$\alpha = 0,708 \cdot \alpha_0 . \quad (6)$$

Подставив (5) и (4) в (6), получим распределение коэффициента теплоотдачи по высоте здания в области градиентного течения

$$\alpha = 5,066 \bar{U}(Z) = 5,066 U_0 (h/h_0)^n . \quad (7)$$

Коэффициент теплоотдачи на боковой поверхности здания, на которой формируется область отрыва потока, определяется с учетом структуры течения воздуха возле нее – для области отрыва, соответствующей месту прилипания потока (координата $x/\delta_{отр} < 7$, где $\delta_{отр}$ – высота отрывной области, x отсчитывается от координаты положения δ_{max}) [6], α_n определяется как

$$\alpha_n = 0,115 \cdot \rho \cdot U_D \cdot (\bar{x} + 5) ,$$

при $U_D = 1,41 \cdot U_0$ [6, 7] или после преобразования

$$\alpha = 0,162 \cdot \rho \cdot U_0 (0,23 \cdot \bar{x} + 5) , \quad (8)$$

где $\bar{x}=5$ соответствует сдвигу δ_{max} вследствие влияния поворота потока при движении в области градиентного течения.

Для заветренной стороны здания коэффициент теплоотдачи может быть принят согласно [7] в виде

$$\alpha = 0,0199 \cdot \text{Re}_{cp}^{2/3} \cdot \lambda / L , \quad (9)$$

где L – длина здания, м; $\text{Re}_{cp} = U_0 \cdot L/\nu_{cp}$; ν_{cp} – кинематическая вязкость, м²/с; λ – теплопроводность, Вт/(м °С).

Представленные выше зависимости для определения коэффициентов теплоотдачи на наружных поверхностях стен здания позволяют задать условия однозначности для основных элементов здания. При определении коэффициента теплоотдачи на поверхности крыши с учетом формирования области градиентного течения можно использовать уравнение (8).

Коэффициент теплопередачи через окна или так называемые «бы-

стрые потери», изменяющиеся со скоростью изменения внешних условий, может быть представлен в виде

$$k = 1/R_{\text{ост}} = 1/\left(R_B + \sum_1^n R_c + \sum_1^n \frac{1}{\alpha_{\text{л}} + \alpha_{\text{к}}} + R_H\right)^{-1}, \quad (10)$$

где $R_B = 1/\alpha_{\text{в}}$; $R_c = \delta/\lambda$; $R_H = 1/\alpha_{\text{н}}$; δ – толщина стекла, λ – теплопроводность стекла; $\alpha_{\text{к}}, \alpha_{\text{л}}$ – конвективный и лучистый коэффициенты теплоотдачи.

Термическое сопротивление стекла принимается равным $R_c = 0,00418 \text{ (м}^2\text{К)/Вт}$. Лучистый коэффициент теплоотдачи определяется согласно зависимости

$$\alpha_{\text{л}} = 4,548 + 2,25 \cdot 10^{-2} t_2. \quad (11)$$

Температура t_2 в (11) принимается равной температуре наружного воздуха.

При движении воздуха вдоль наружной поверхности ограждения в области градиентного течения и поверхности остекления, утепленной на глубину $h \approx 0,2 \text{ м}$, на поверхности остекления формируется область отрыва, для которой значение конвективной составляющей коэффициента теплоотдачи $\alpha_{\text{к}}$ равно

$$\alpha_{\text{к}} = 1,1 \cdot \rho \cdot U_D, \quad (12)$$

где U_D – скорость воздуха, движущегося вдоль поверхности стены, равная вблизи оконного проема $U_D = 0,54 \cdot \bar{U}(Z)$.

В этом случае для окон, расположенных с наветренной стороны здания, $\alpha_{\text{к}}$ можно принять с учетом изменения скорости ветра по высоте, т.е. $\alpha_{\text{к}} = 0,55 \cdot \rho \cdot \bar{U}(Z)$. В области торможения $\alpha_{\text{к}}$ определяют согласно (5).

Тепловые потери в результате инфильтрации и с уходящим воздухом за время τ для квартир, находящихся с наветренной стороны, можно определить как

$$Q_{\text{вент}} = (16,61 \cdot (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) \cdot (\Delta P)^{\frac{2}{3}} \cdot F_{\text{ок}} + c_p \rho (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) \cdot W_{\text{к}}) \cdot \tau, \quad (13)$$

где $Q_{\text{вент}}$ – тепловые потери с уходящим воздухом, т.е. в результате инфильтрации и потери тепла при работе естественной вытяжной вентиляции.

Для квартир, находящихся на боковой и заветренной стороне,

$$Q_{\text{вент}} = c_p \rho_v (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) \cdot W_{\text{к}} \cdot \tau.$$

Здесь $F_{\text{от}}$ – отопляемая площадь, м^2 ; $W_{\text{к}}$ – объемный расход воздуха в канале вытяжной вентиляции, который для естественных систем вентиляции принимается равным $0,175 \text{ м}^3/\text{с}$ [8].

Перепад давления ΔP в уравнении (13) имеет вид:

$$\Delta P = 5,50 \cdot H \cdot (\rho_{\text{н}} - \rho_{\text{в}}) + 3,0 \cdot \rho_{\text{н}} \cdot U_0^2.$$

Представленная методика управления тепловым режимом здания позволяет при известных геометрических и теплофизических характеристиках жилых зданий определить:

- коэффициент теплоотдачи на наружных стеновых и светопрозрачных ограждениях с учетом скорости и направления ветра;
- температуру источника тепла для каждого помещения с учетом его расположения;
- тепловую нагрузку как одного здания так и группы зданий.

В качестве примера рассмотрим здание типовой серии I-464А. Высота здания 15,04 м, длина – 52,5 м, ширина – 11,95 м.

При определении тепловой нагрузки здания были приняты: длительность – два интервала по 12 ч (сутки); температура наружного воздуха $t_{\text{н}} = -20^\circ\text{C}$ и $t_{\text{н}} = -15^\circ\text{C}$; скорость ветра $U_0 = 5 \text{ м/с}$; угол натекания $\varphi = 90^\circ$.

Чтобы определить коэффициент теплоотдачи на наветренной стороне здания, необходимо вычислить протяженность областей торможения и градиентного течения потока. Длина области градиентного течения с каждой стороны здания может быть принята равной $l = 5 \text{ м}$ [5]. С учетом этого длина области торможения на наветренной стороне здания составит 42,5 м.

Коэффициент теплоотдачи на наветренной стороне здания в области торможения потока определяется согласно зависимости (5) и в области градиентного течения – (7). На боковой поверхности наружного здания $\alpha_{\text{н}}$ вычисляется согласно (8), на заветренной – (9). Результаты расчета коэффициентов теплоотдачи на наружных поверхностях здания представлены на рис.1.

Зная граничные условия на наружных поверхностях здания, согласно (2) можно определить температуру источника в каждом его помещении (рис.2).

Как следует из рис.2, расположение помещения по высоте здания на заветренной боковой или наветренной стороне (последняя, в свою очередь, разделяется на область градиентного течения воздушного потока и область торможения) оказывает существенное влияние на

температуру источника тепла. При этом перепад температур $\Delta t_{\text{и}}$ между источниками тепла помещений, расположенных на последнем и первом этажах, составляет примерно 25-35 °С, при условии задания температуры внутреннего воздуха в помещениях $t_{\text{в}} = 21,5$ °С. В настоящее время при существующей системе отопления в жилых зданиях $\Delta t_{\text{и}}$ составляет 1,5-3 °С, что приводит к недотопам помещений, расположенных на последнем, и перетопам помещений, расположенных на средних этажах здания.

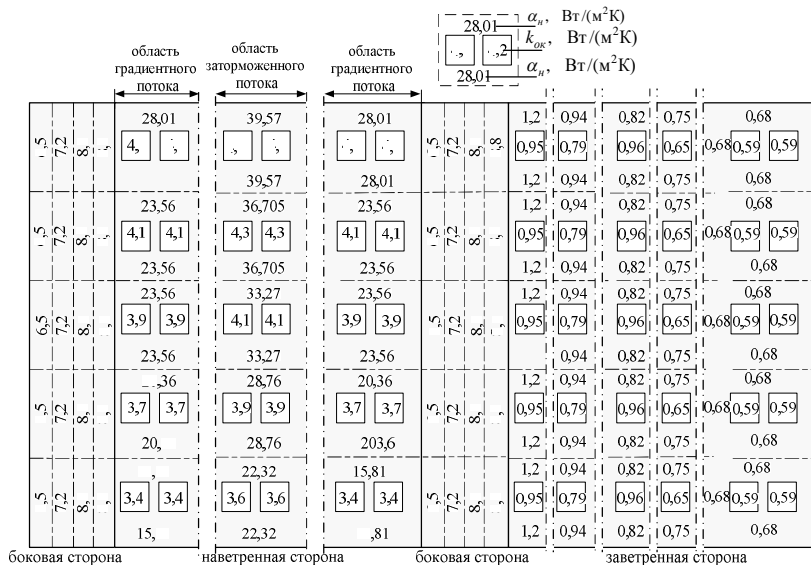


Рис.1 – Изменение коэффициента теплоотдачи и коэффициента теплопередачи по сторонам здания (Вт/(м²К))

В результате проведенных расчетов суммарная тепловая нагрузка системы отопления здания типовой серии I-464А, определенная исходя из тепловой нагрузки каждого помещения, составила $Q'_{\text{о}}=3597,371$ кВт·ч/сут. Тепловой район, для которого рассчитывалась данная тепловая нагрузка, включает 49 жилых зданий. Из них типовой серии I-464 – 25, I-438 – 7, А-163 – 1, I-447С – 17. Суммарная тепловая нагрузка системы отопления зданий, полученная в результате суммирования теплопотерь каждого здания теплового района, составила $\Sigma Q'_{\text{о}}=356927$ кВт·ч/сут.

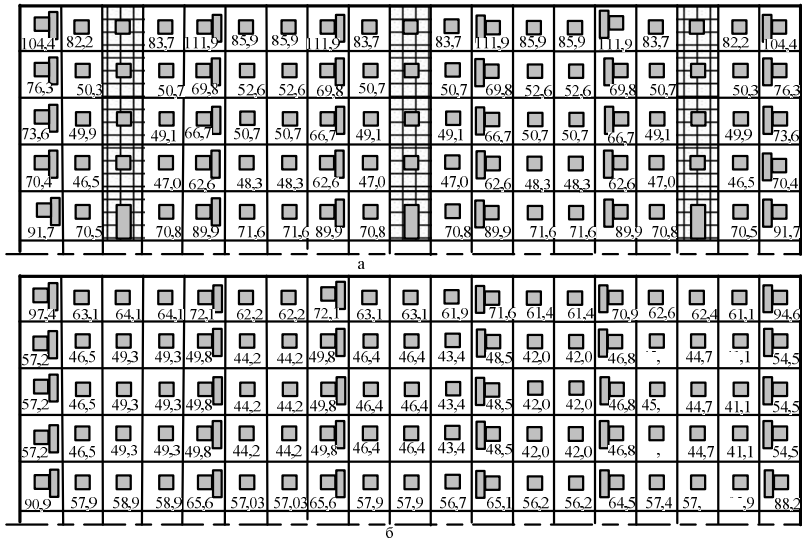


Рис.2 – Изменение температуры источника на наветренной (а) и заветренной (б) стороне здания при температуре наружного воздуха -15°C .

Таким образом, тепловая нагрузка, определенная для каждого здания с учетом его расположения относительно направления ветра, позволяет определить мощность системы отопления теплового района в течение суток и ее изменение во времени с учетом погодных условий. Предложенная методика позволяет прогнозировать потребление тепловой энергии как одним помещением или зданием, так и тепловым районом в целом в зависимости от типа местности, геометрических характеристик здания (размеров наружных поверхностей, высоты этажа), скорости и направления ветра.

1.Малыренко В.А. Основы теплофизики будівель та енергозбереження. – Харків: Вид-во «САГА», 2006. – 484 с.

2.Голощапов В.Н., Орлова Н.А. Выбор временного интервала изменения температуры наружного воздуха для системы управления отпуском тепла на ТЭЦ // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2005. – №4. – С.58-62.

3.СНИП II.3.-79**. Строительная теплотехника / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 32 с.

4.Davenport A.G. The spectrum horizontal gustiness near the ground in high winds // Quart J. Roy. Meteor. Soc. – 1961. – №87. – pp.194-211.

5.Малыренко В.А., Голощапов В.Н., Барсуков В.А., Котульская О.В., Черноусенко О.Ю. Теплообмен и газодинамика в камерах отбора паровых турбин. – К.: Наукова думка, 1991. – 240 с.

6.Шляжас Р. Б. Турбулентный перенос импульса и тепла в пограничном слое за препятствием: Автореф. дисс. ... к.т.н. – Каунас: Ин-т ФТПЭ, 1985. – 17 с.

7.Чжен П. Отрывные течения. Т.3. – М.: Мир, 1973. – 336 с.

8.Мхитарян Н.М. Энергосберегающие технологии в жилищном и гражданском строительстве. – К.: Наукова думка, 2000. – 412 с.

Получено 26.09.2006

УДК 658.24

А.А.АЛЕКСАХИН, канд. техн. наук

Харьковская национальная академия городского хозяйства

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ТРУБОПРОВОДАХ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ

Предлагается формула для нахождения значений температуры теплоносителя в сечениях по длине подающего трубопровода тепловых сетей, которую можно использовать на начальных стадиях проектирования систем теплоснабжения. Выполнен анализ точности вычислений с использованием предложенной зависимости.

Большая протяженность тепловых сетей при централизованном теплоснабжении обуславливает существенные потери теплоты в окружающую среду при транспортировании теплоносителя по трубопроводам. Нормативными материалами [1] предельная величина тепловых потерь за счет охлаждения воды в трубопроводах теплосети в долях от отпущенной теплоты определены в размере 1% на каждые 100 м при длине трассы до 300 м; 2,9% на всю длину при протяженности до 500 м; 4,8% на всю длину при длине до 1000 м. При длине теплотрассы более 1000 м – не более 13% на всю длину.

Более точно при известной конфигурации тепловых сетей, диаметрах трубопроводов, способах прокладки и характеристике теплоизоляционной конструкции тепловые потери определяют по известной методике [2], которая предполагает предварительное разбиение сети на расчетные участки, в пределах каждого из которых диаметр и расход остаются неизменными. Температуру теплоносителя в конечной точке сети определяют по известной температуре на входе в трубопровод при поэтапном вычислении изменения температуры на каждом из участков. Сделать такие оценки на начальных этапах проектирования систем теплоснабжения районов застройки до проведения трассировки и выполнения гидравлического расчета тепловых сетей не представляется возможным, что затрудняет полноценное сравнение возможных вариантов исполнения системы теплоснабжения. Особенно важно учитывать остывание воды в квартальных сетях при устройстве индивидуальных тепловых пунктов для присоединения водонагревательных установок горячего водоснабжения. В этом случае охлаждение греющего теплоносителя в сетях должно быть компенсировано либо увеличением теплообменной поверхности водонагревателей, либо увеличением расходов сетевой воды.